

华南理工大学
South China University of Technology

华南理工大学 | 土木与交通学院
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING & TRANSPORTATION
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

# 船舶阻力

## 第七讲：船在限制航道中的阻力

## （4学时）

焦甲龙 主讲

船舶与海洋工程系

2023年10月



华南理工大学
South China University of Technology

# 目录

## 第七讲：船在限制航道中的阻力

- 1 浅水对阻力的影响
- 2 确定浅水阻力的方法
- 3 狭水道对阻力的影响



South China University of Technology

# 限制航道

无界水域

深水航道







限制水域

浅水航道





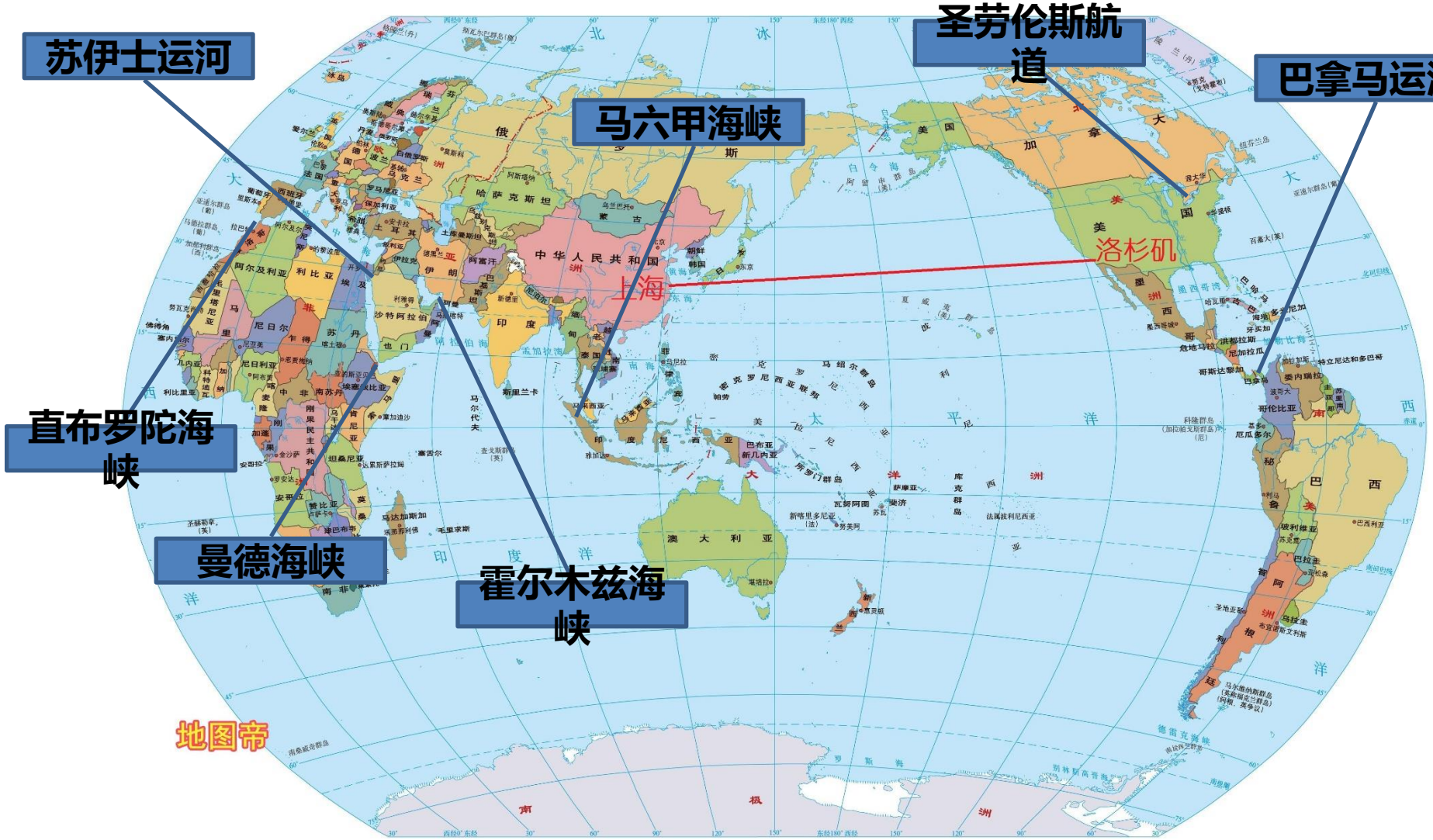
狭窄航道





South China University of Technology

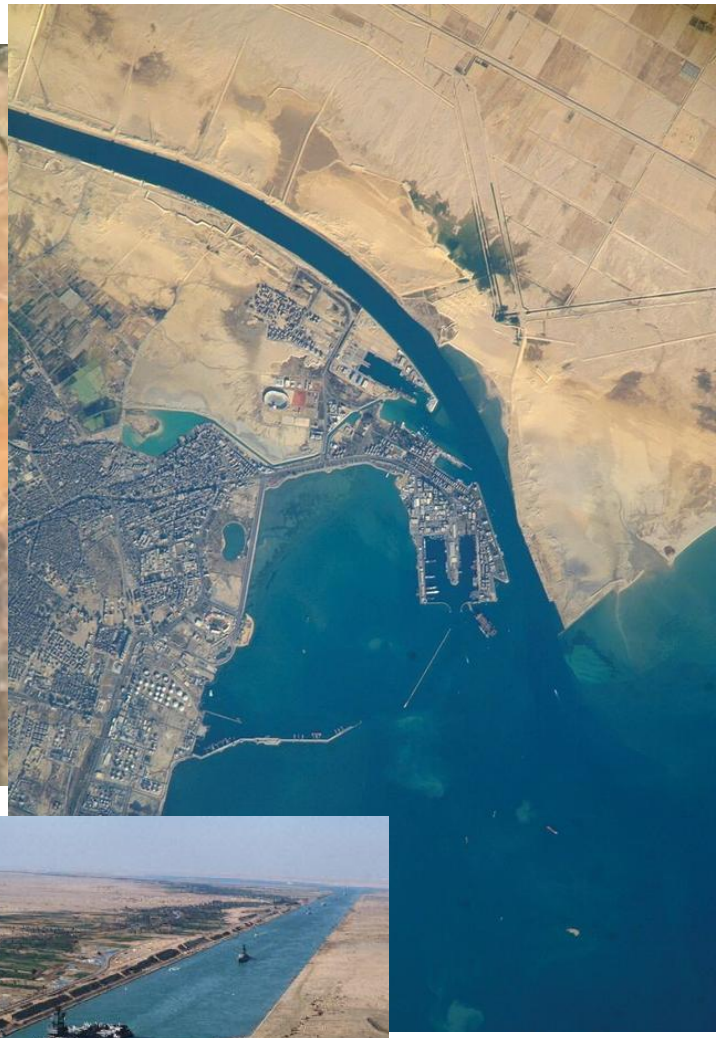
# 世界主要航道




华南理工大学
South China University of Technology

# 苏伊士运河　河面平均宽度为135米，平均深度为13米



亚洲、非洲、欧洲三大洲的
人们来往的主要航道



华南理工大学
South China University of Technology

# 巴拿马运河

**宽的地方达304米，最窄的地方152米。**

巴拿马运河位于中美洲国家的巴拿马。是连接太平洋和大西洋的重要航道，被誉为“世界七大工程奇迹之一”的世界桥梁。






South China University of Technology

**影响因素：**

航道对船舶阻力的影响主要取决于航道的深度、宽度和船舶主尺度、航速之间的相对情况。

**分类：**

限制航道主要分为浅水航道和狭窄水道两类，其对船舶阻力的影响也有所不同。

华南理工大学
South China University of Technology

# 1 浅水对阻力的影响

浅水对阻力的影响主要是由于船体周围的流场及兴波情况发生变化引起的。

## 一、浅水对船体周围流场和粘性阻力的影响

浅水中船周围的流场发生变化，主要表现为船侧、船底的流速比深水增大，压力降低，致使粘性阻力增加。同时，使船的吃水增加和船的航态发生变化。

1. 回流速度增大

2. 航态变化

3. 对粘性阻力的影响

华南理工大学
South China University of Technology

# 1、回流速度增大

**回流速度：**流体在流经船体时，由于船体曲率的影响，除了船舶的艏艉两端外，船体周围的水流速度较来流速度大。设其平均增量为△V1，由于△V1与船速方向相反，故称为回流速度。

$$\Delta v = v_{水} - v_S$$

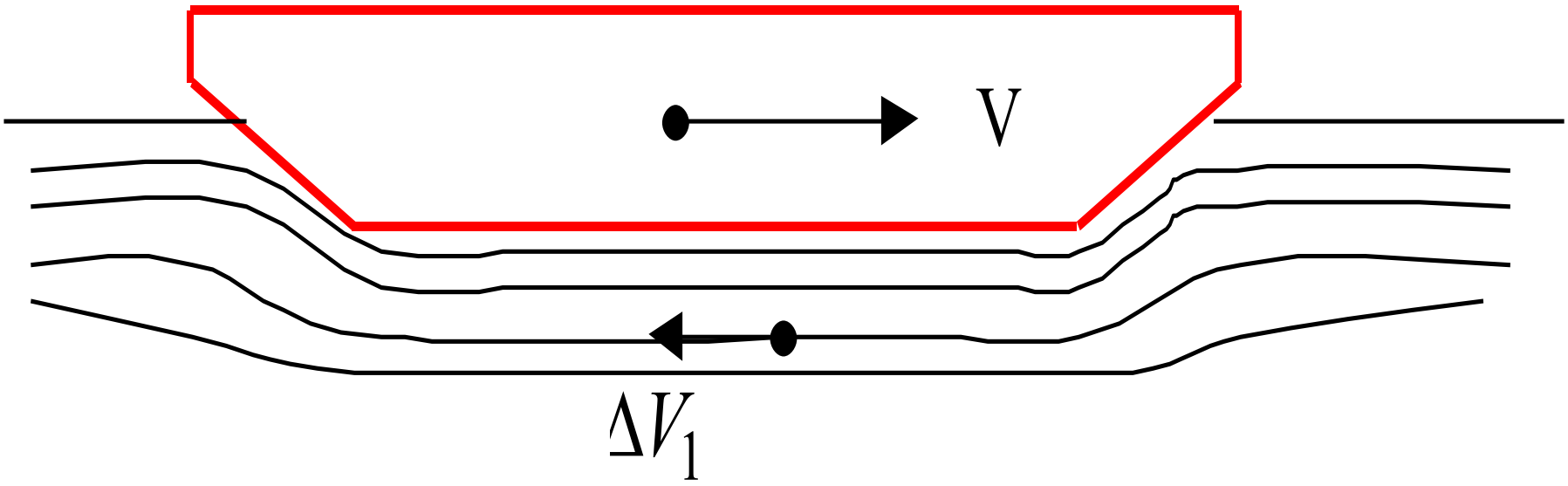



图1 深水理想情况

华南理工大学
South China University of Technology

在浅水理想流体中，受水深限制，船底和水底之间的间隙(称为剩余水深) 较小，根据连续方程，水流流经船体时，船体周围的流速较无限水深情况时大，即回流速度增大，记为△v2，显然△v2 > △v1。

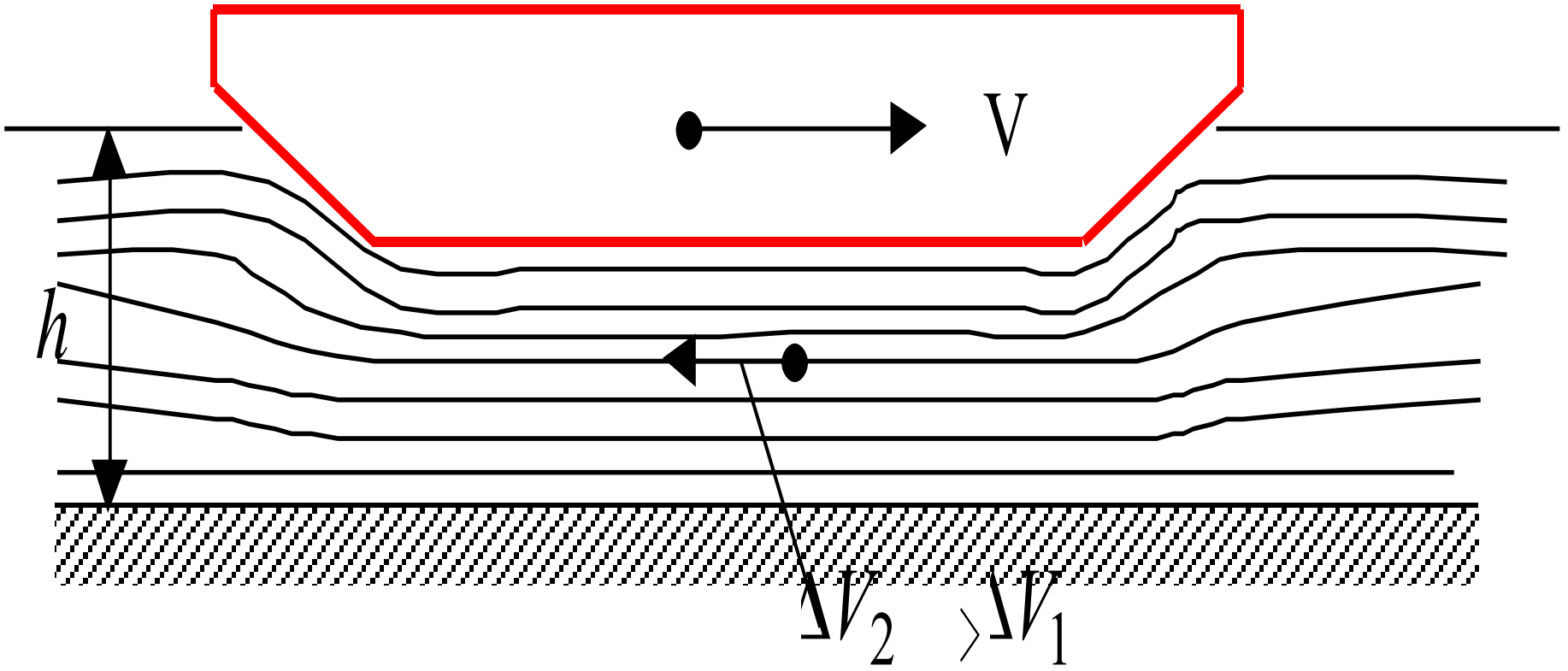



图2 浅水理想流体情况

华南理工大学
South China University of Technology

在浅水实际流体中，受流体粘性影响，在船底形成由前向后逐渐变厚的边界层，使两边界层之间的水流区更窄，流体的速度更快，即回流速度$\triangle v_3$进一步增大，显然$\triangle v_3 > \triangle v_2$。

由于浅水对流场影响使回流速度增大的现象称为浅水阻塞效应。实验结果表明，回流速度$\triangle v$与$\sqrt{Am}/h$(Am舯横剖面面积)或水深吃水比 h/T 有关。

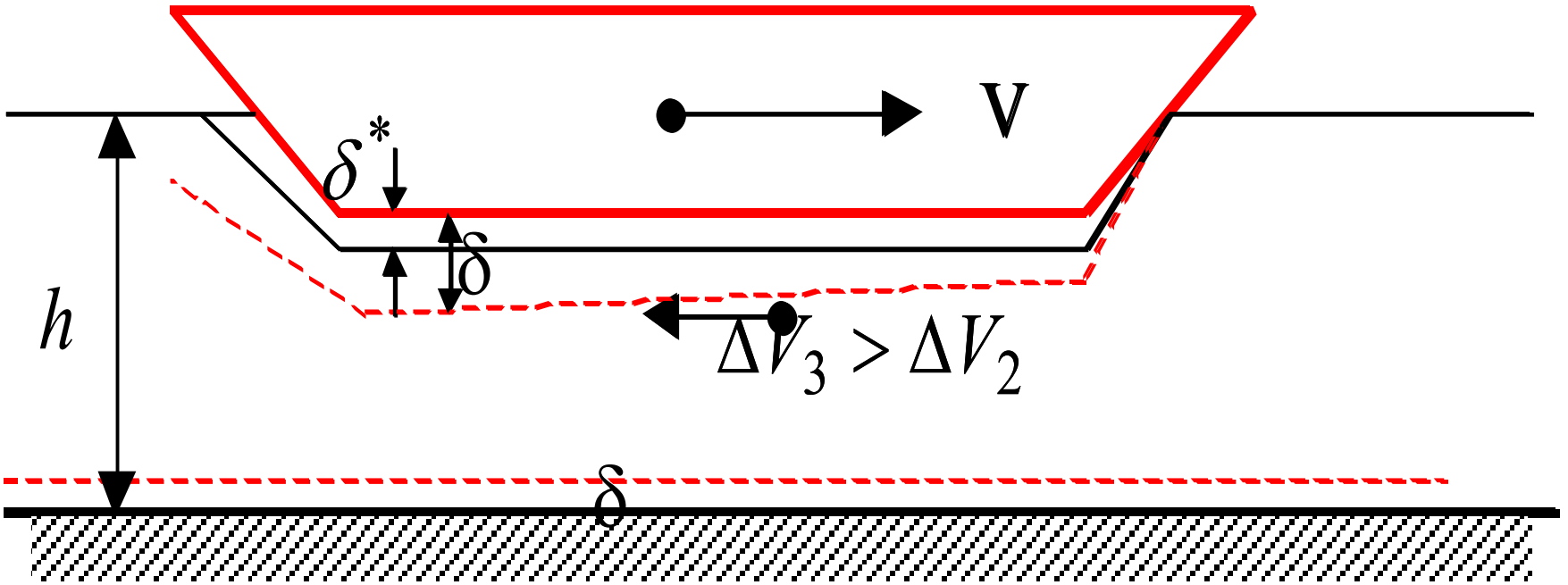



图3 浅水中实际的流动情况

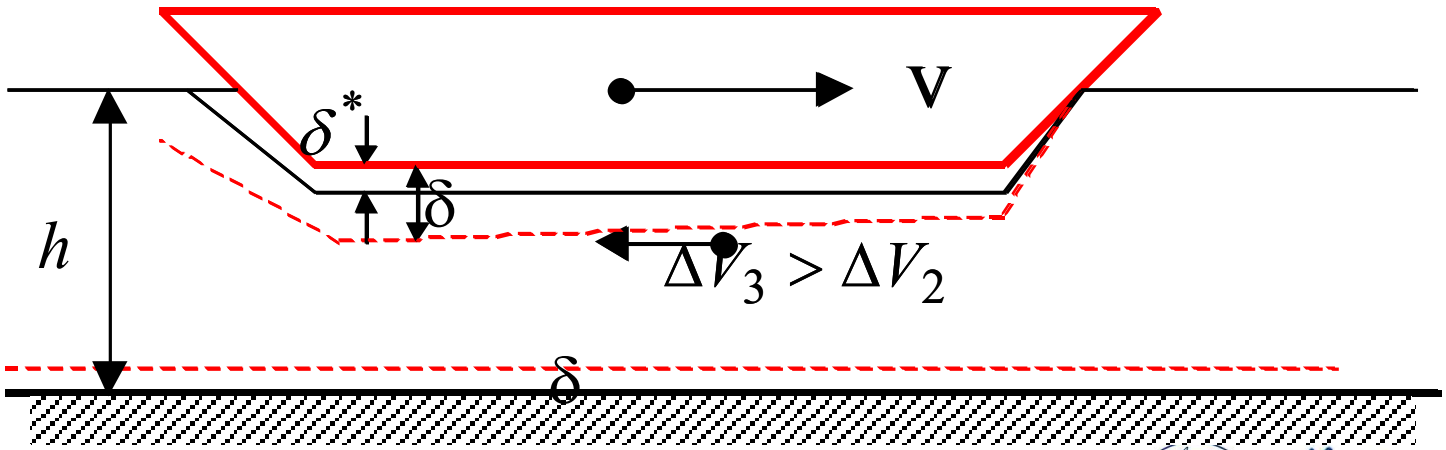
华南理工大学
South China University of Technology

## 2、航态变化

船舶在浅水中航行时，船体周围流场受浅水影响的同时，还伴随航态变化：

① 由于船底流速增加，压力降低，从而使船体下沉，吃水增加。

② 因船底和河床边界层厚度均自船首向船尾逐渐增加，因而船尾与河床的间隙比船首更小，流速增加更大，压力降低更甚，船尾下沉较船首大，而产生尾倾。




浅水中船的纵倾与平均下沉

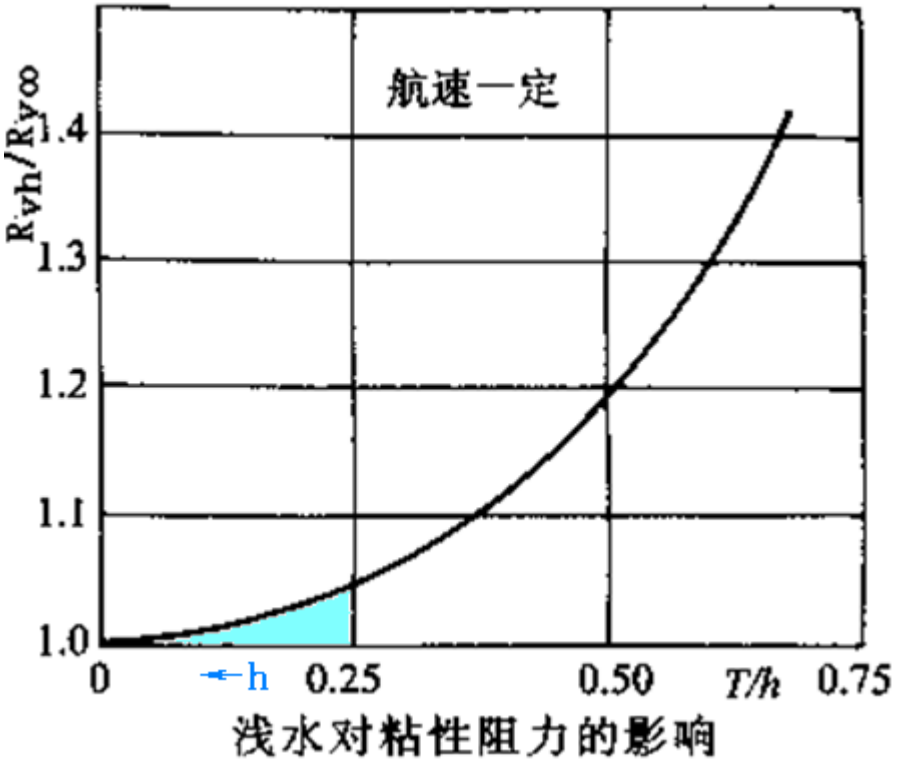
华南理工大学
South China University of Technology

# 3、对粘性阻力的影响

由于船体下沉舷侧湿面积增加，必然使摩擦阻力增大。

回流使水流与船体的相对速度明显增大，压力下降，压力梯度增大；同时船尾与河床的间隙小，易产生旋涡，所以粘压阻力随之增加。

图中可见，T/h≥0.25，即使无分离现象，浅水对粘性阻力有明显影响，且影响程度随 T/h 的增加而增大。




浅水对粘性阻力的影响

h=4T　　h=2T　　h=4/3T

华南理工大学
South China University of Technology

# 二、浅水对兴波及兴波阻力的影响

在水深受到限制的情况下，兴波情况变化很大。理论分析和试验结果都表明与水深傅汝德数Frh有关。

$$Fr_h = \frac{V}{\sqrt{gh}} = \frac{V}{\sqrt{gL}} \cdot \sqrt{\frac{L}{h}} = Fr \cdot \sqrt{\frac{L}{h}}$$

由此可知，浅水中的兴波不仅取决于速度参数Fr，而且与水深参数 L/h 有关。讨论浅水影响兴波情况时，均用 Frh 作参数。

1. 浅水引起波浪参数的改变
2. 浅水引起波浪图形的变化
3. 浅水对兴波阻力的影响

华南理工大学 South China University of Technology

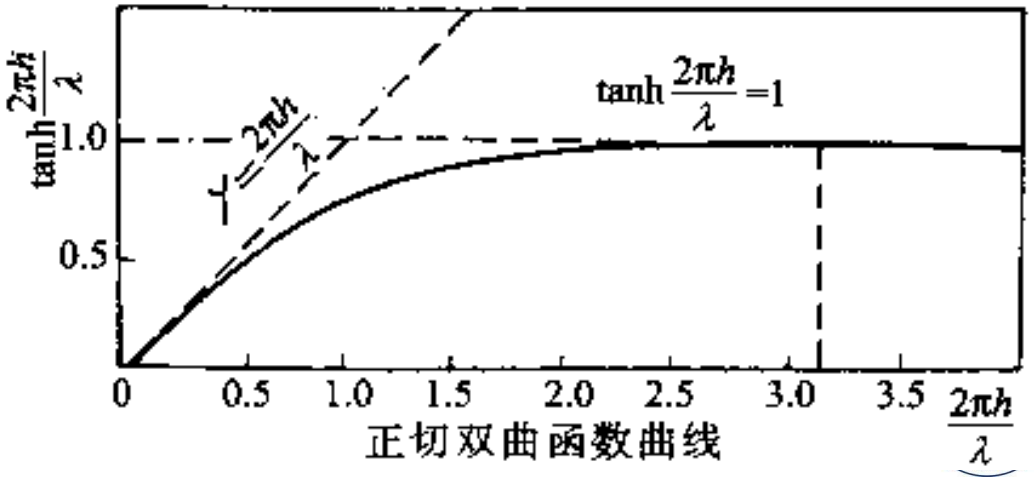
# 1）浅水引起波浪参数的改变

按波浪理论，深水波中水质点在其平衡位置附近作轨圆运动；而当水深有限时，轨圆运动相应变成椭圆运动。

浅水中的波速：$c_h = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}\tanh\frac{2\pi h}{\lambda}} = c\sqrt{\tanh\frac{2\pi h}{\lambda}}$

$C = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$ 深水波情况波长为λ时的波速。

由上式知：浅水中的波速不但与波长有关，还与水深*h*有关。

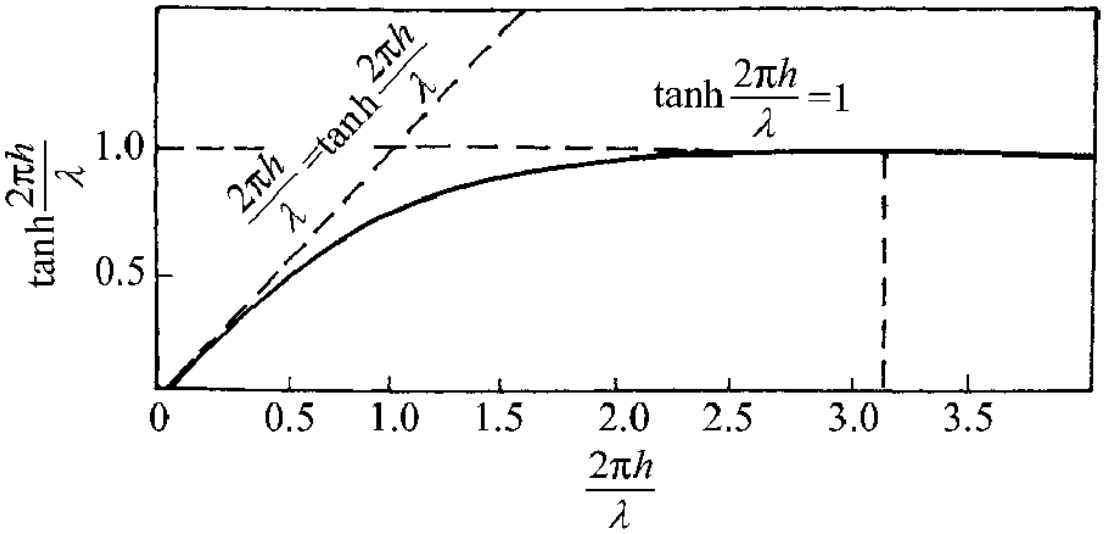



华南理工大学
South China University of Technology

（1） 深水情况：$\frac{2\pi h}{\lambda}$ 很大时，$\tanh\frac{2\pi h}{\lambda}\approx 1$ ，则有：

$$C_h \approx \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} = C$$

根据正切双曲函数知：当$h=\lambda/2$时，则$C_h=0.996C$，因而当水深满足$h>\lambda/2$时，可以按深水情况处理。




华南理工大学
South China University of Technology

（2） 浅水情况，即**h**为有限值时，$\tanh\frac{2\pi h}{\lambda}<1$

则有：$C_h<C$

因此，波长相同的波浪，浅水中的波速将小于深水中的波速，这种现象称为波速损失，显然波速损失**ΔC**应该为：

$$\Delta C = C - C_h = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} - \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}\sqrt{\tanh\frac{2\pi h}{\lambda}} = C(1-\sqrt{\tanh\frac{2\pi h}{\lambda}})$$

或写成 $$\Delta C = V_\infty(1-\sqrt{\tanh\frac{2\pi h}{\lambda}}) = V_\infty(1-\sqrt{\tanh\frac{1}{Fr_h^2}})$$

式中$V_\infty$为深水中的船速，其数值与波速**C**相等。

华南理工大学 South China University of Technology

由此可作如下分析：

①同一船如果在浅水中和深水中产生相同波长的波浪（即λ相同），在浅水中航行时船速将下降ΔC。这表明浅水情况的兴波阻力较深水情况为大。

②如果同一船在浅水中和深水中兴起的波速相同，即$C_h=C$，也就是要求两者保持相同航速，则浅水中的波长$\lambda_h$必定较深水中的波长λ为大。这是因为：

华南理工大学
South China University of Technology

$$C_h = \sqrt{\frac{g\lambda_h}{2\pi}\tanh\frac{2\pi h}{\lambda_h}} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}\sqrt{\frac{\lambda_h}{\lambda}\tanh\frac{2\pi h}{\lambda_h}}$$

因$\tanh\frac{2\pi h}{\lambda_h} < 1$，所以如要求$C_h = C = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$，则

必有$\lambda_h/\lambda > 1.0$，即$\lambda_h > \lambda$。

因此，浅水中兴波的能量必较深水情况为大，说明同一船舶在浅水中航行时的兴波阻力较深水中的为大。

华南理工大学
South China University of Technology

③由 $\Delta C = V_\infty (1 - \sqrt{\tanh \frac{1}{Fr_h^2}})$

表明$Fr_h$确实是影响兴波的重要参数。

当$Fr_h$<0.5时，ΔC≈0，说明浅水对兴波的影响极小；

$Fr_h$越大，则ΔC值越大，浅水对兴波的影响越显著。

华南理工大学
South China University of Technology

（3） **水深极浅的情况**，即 $\frac{2\pi h}{\lambda}$ 很小

当 $\frac{2\pi h}{\lambda} \to 0$ 时，$\tanh\frac{2\pi h}{\lambda} \to \frac{2\pi h}{\lambda}$

$$C_h = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}\tanh\frac{2\pi h}{\lambda}} = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}\cdot\frac{2\pi h}{\lambda}} = \sqrt{gh}$$

$\sqrt{gh}$-----水深***h***时的**极限波速**。

根据**船速**与**极限波速**的相对大小，可将船速分为三个阶段：

华南理工大学 South China University of Technology

①亚临界速度区：当$V<\sqrt{gh}$，即$Fr_h$<1.0

②临界速度区：当$V=\sqrt{gh}$　即$Fr_h$=1.0

③超临界速度区：当$V>\sqrt{gh}$，即$Fr_h$>1.0

$Fr_h$实际上表示了船速与极限速度的相对大小，以及船舶所处的航速区。

在不同的航速区内，不仅船舶的运动情况不同，而且兴波阻力，兴波图形有着明显的变化。

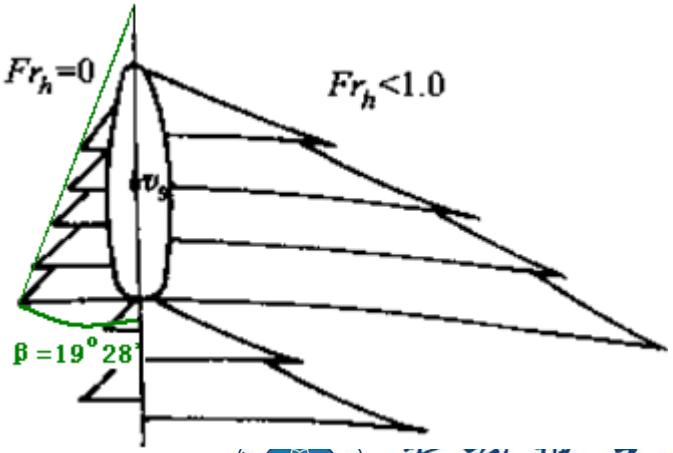
华南理工大学
South China University of Technology

# 2. 浅水引起波浪图形的变化

➢① 亚临界速度区（ $Frh = Fr.\sqrt{L/h} < 1$）：

在低航速段，即$Fr_h<0.5$，波速损失△c≈0，因此兴波变化极小，开尔文角β变化甚微，可认为与深水情况相同。

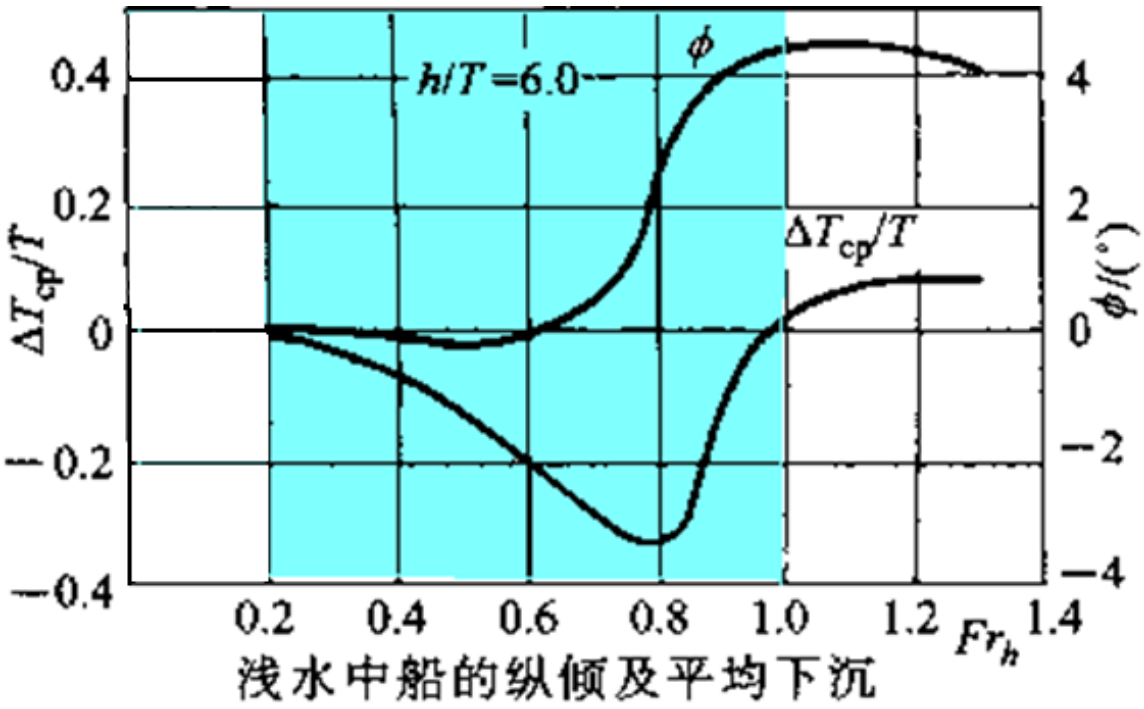
在较高航速段，即$0.5<Fr_h<1.0$时，浅水中的波长将大于深水中相同航速下的船行波波长，同时β角随Frh 增大而变大，波浪的覆盖面即兴波的扇形面扩大，兴波阻力随之增大。




South China University of Technology

# ① 亚临界速度区

根据航态观察，在这一速度区内，特别是 $Fr_h \rightarrow 1.0$时，有明显的尾倾角φ，△Tcp为负值，表示船体下沉。船首明显上抬，尾部严重下沉。



浅水中船的纵倾及平均下沉

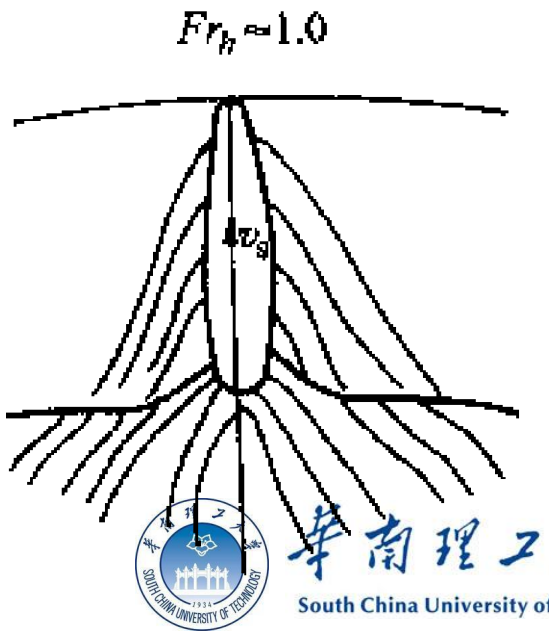
ΔTcp=T-Th

华南理工大学
South China University of Technology

# ② 临界速度区

当 $Fr_h \approx 1.0$，$vs \approx \sqrt{gh}$时，β角增大至 90°。船的横波和散波合并，在船首处形成图示的一个很大的波峰，兴波阻力剧增，此时船的尾倾最大。

理论上该情况仅发生在$vs=\sqrt{gh}$ 时，但试验表明，在$vs=(0.8 \sim 1.2)\sqrt{gh}$范围内，都可能不断出现以高于船速向前传播的孤立波，因此，临界速度区确实存在，在这一速度区内，船舶的运动、阻力、波形往往呈不稳定现象。



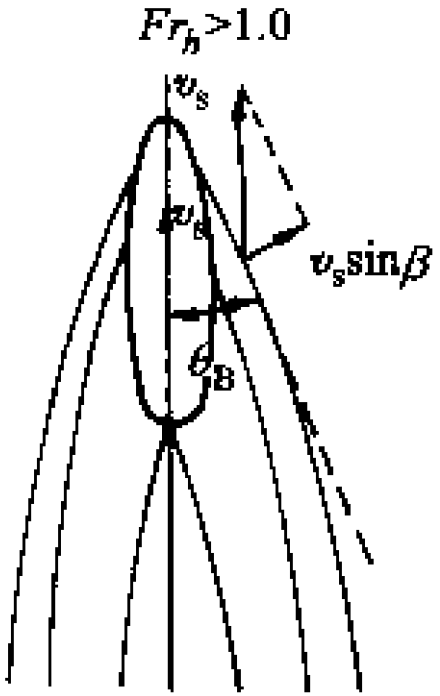

South China University of Technology

# ③ 超临界速度区

当 $Fr_h>1.0$，$vs>\sqrt{gh}$时，船速超过水波的极限移动速度，因此横波消失，孤独波亦不存在，仅剩有散波。因散波沿其波顶法线方向运动速度为$v_s\sin\beta$，考虑到波之极限传播速度为$\sqrt{gh}$，故有：$v_s\sin\beta\leq\sqrt{gh}$

即 $\sin\beta\leq\sqrt{gh}/v_s=1/Fr_h$

可见，当 $vs>\sqrt{gh}$时，β将随船速的提高而减小，即波浪扇形面的范围变小，如图所示。

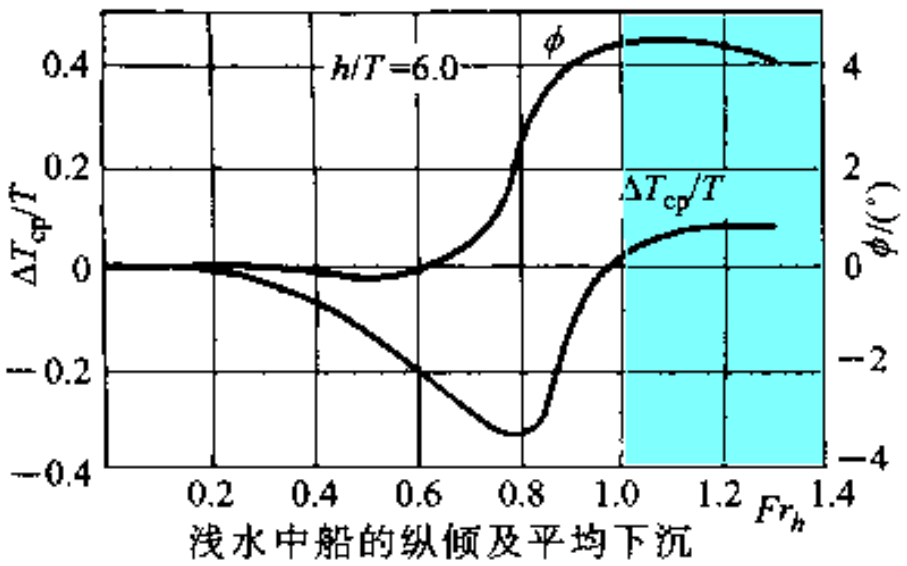



华南理工大学
South China University of Technology

# ③超临界速度区

由于横波消失，散波宽度随 $Fr_h$增大而减小，因而兴波阻力急剧减小，达到某一船速后，浅水中的总阻力较深水中的阻力还要低。

另外航态观察可见：船舶处在超临界速度航行时，如图所示，尾倾虽有所减小，但仍较明显，平均吃水较深水情况要小。

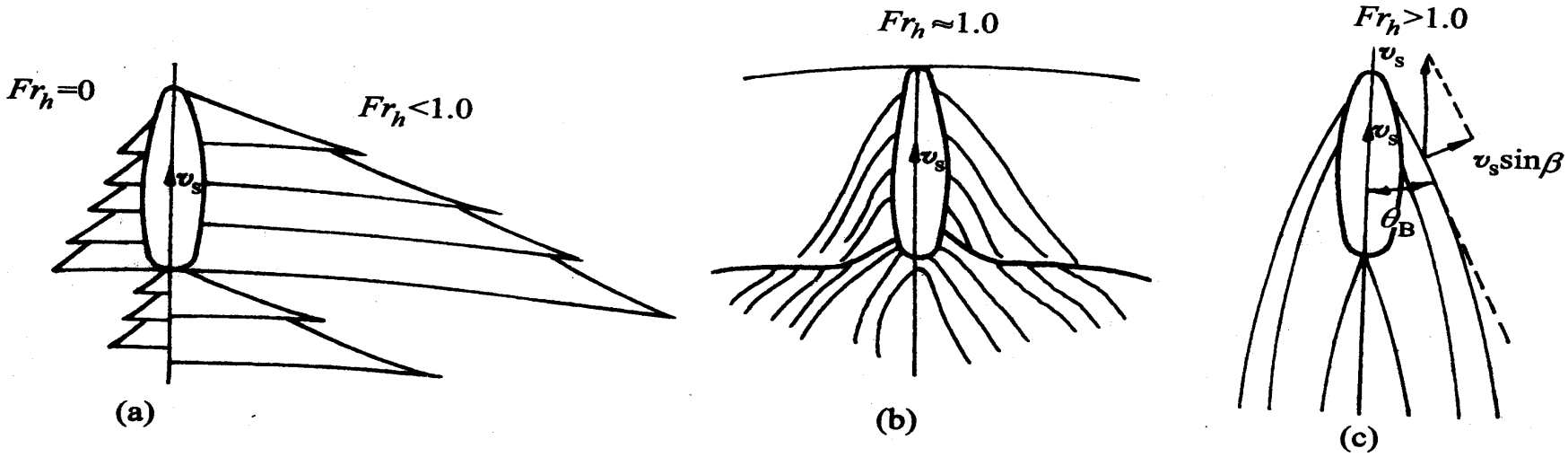


浅水中船的纵倾及平均下沉

ΔTcp=T-Th

华南理工大学
South China University of Technology

# 小结：

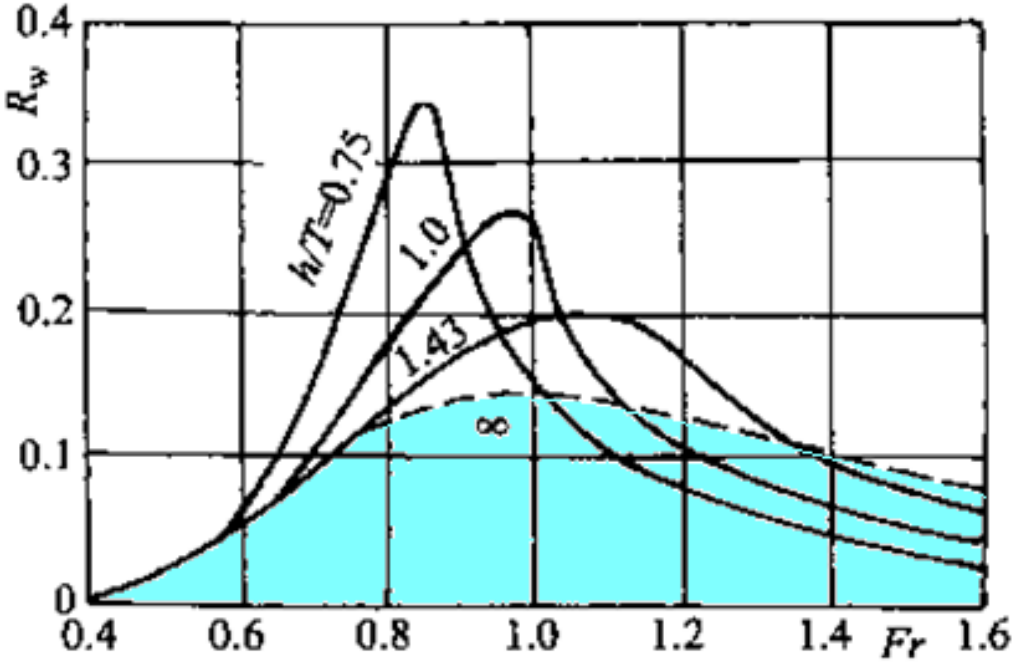



- 当$Fr_h < 0.5$时， 兴波变化极小，所以β角变化甚微
- 当$0.5 < Fr_h < 1.0$时，β角变大 船首明显上抬，船尾严重下沉
- 当$Fr_h \approx 1.0$时，船的横波和散波合并，β角增大至90°，船首处形成很大的波峰（孤独波） 兴波阻力急剧增加，周期变化，尾倾最大
- 当$Fr_h > 1.0$，即$V_s > V_k$时，船速已超过水波的极限移动速度，因此横波消失，孤独波亦不存在 兴波阻力不断减小，尾倾有所减小，但平均吃水比深水小

华南理工大学 South China University of Technology

# 3. 浅水对兴波阻力的影响

海佛洛克(Havelock)根据兴波理论，得到不同水深时的兴波阻力曲线。所有曲线的峰点所对应的速度均在$vs/\sqrt{gh}=1.0$。此时的阻力较深水阻力大得多，但在超临界速度的高速段，反较深水为小。



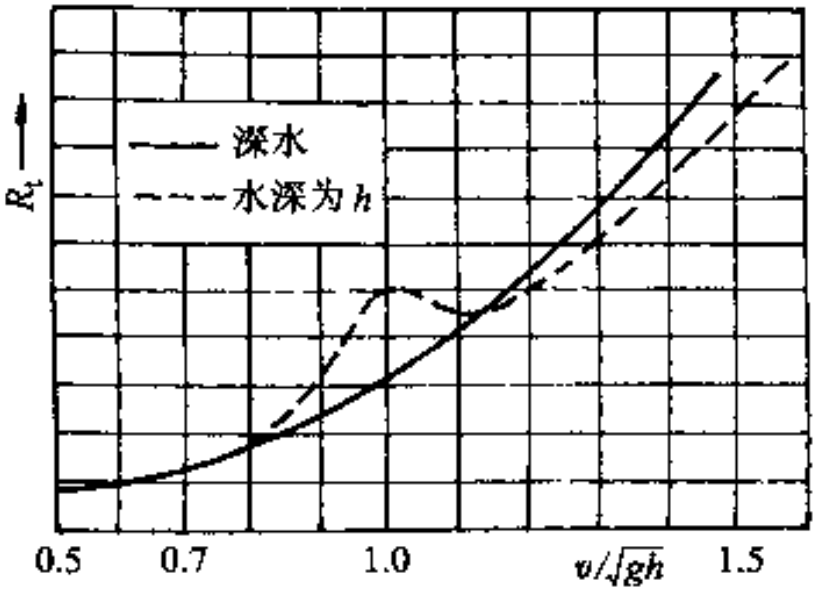
浅水对兴波阻力的影响

华南理工大学
South China University of Technology

# 三、浅水阻力曲线的特点

综上所述，船舶在有限水深中航行时，由于水浅，使水与船体的相对速度增大，对粘性阻力产生影响；同时，兴波图形变化很大，以致使船的阻力性能和船的航态等均发生变化，这种现象统称为浅水效应。

右图是船在浅水和深水情况下的阻力曲线示意图。




浅水和深水中阻力曲线比较

华南理工大学
South China University of Technology

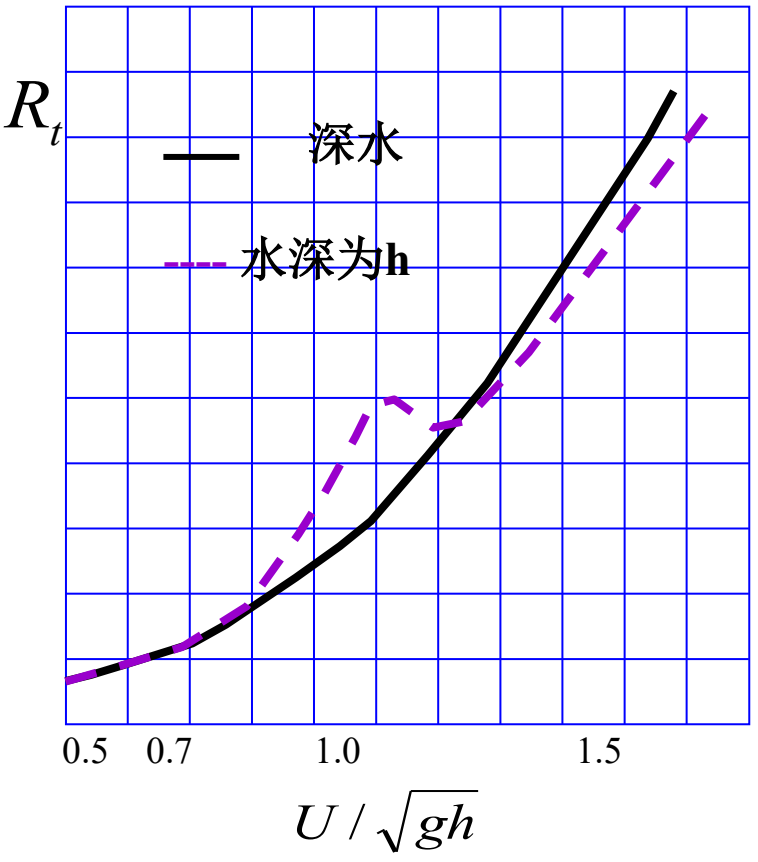
1、在亚临界速度段：

$U<0.5(gh)^{0.5}$（$0<F_{rh}<0.5$），由于船舶的航速较低，浅水阻力与深水阻力没有明显的变化。这是因为航速较低时，浅水对流场和兴波情况的影响很小，所以在这个速度范围一般可以不必考虑浅水影响问题。

2、在亚临界速度段：

$0.5(gh)^{0.5}<U<(gh)^{0.5}$

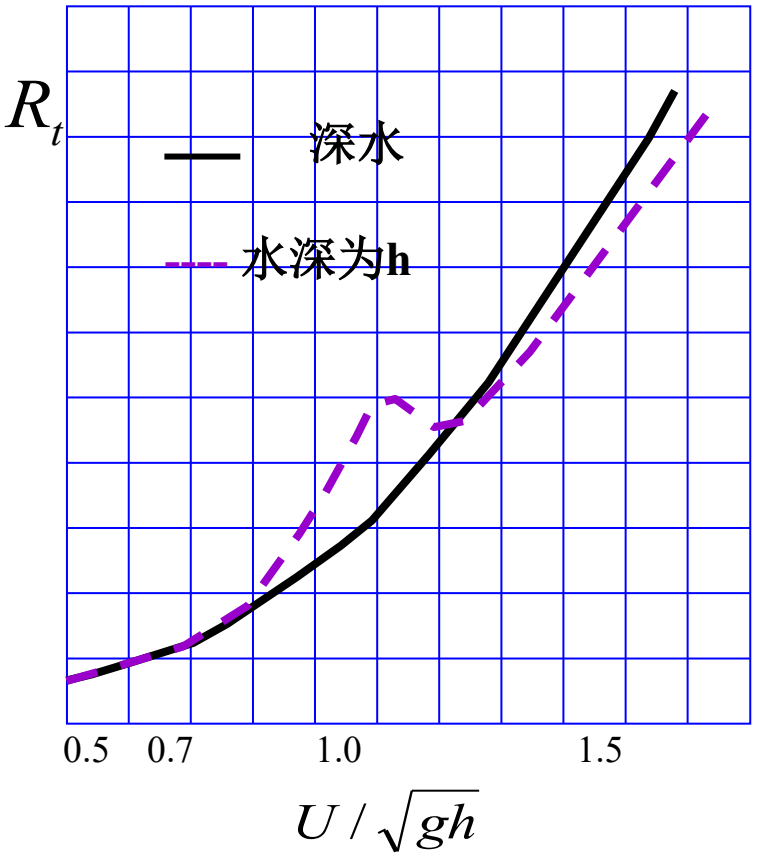
（$0.5<F_{rh}<1.0$），由于航速增大，浅水影响，特别是浅水对船舶兴波的影响渐趋明显，直至在接近临界速度时船首出现“孤立波”，因而浅水情况下的船舶阻力较深水情况显著增加。




浅水和深水中阻力曲线比较

3、**在临界速度处：** $U=(gh)^{0.5}$ （$F_{rh}=1.0$ ），因不断产生大波幅的孤立波，**兴波阻力出现极大值**，船舶总阻力亦出现峰值，与深水中相比有很大增加。

4、**在超临界速度段，** $U>(gh)^{0.5}$ （$F_{rh}>1.0$ ），船速已超过波浪传播速度的极限，横波消失，散波的覆盖面减小，兴波阻力下降很多，船舶的总阻力增速趋缓，甚至在某速度点之后小于对应的深水阻力。




浅水和深水中阻力曲线比较

华南理工大学
South China University of Technology

# 四、不影响阻力的水深条件

浅水对船体阻力的影响在一定情况下相当明显，特别是实船试航时，如不能正确考虑浅水影响，往往会得出错误的结果。因而确定不影响阻力的水深条件是很有意义的。通常认为，满足下列条件可不考虑浅水对阻力的影响。

➢ **1. 从航速看**

由浅水试验知，低速时，浅水对阻力影响很小，一般认为在$Fr_h<0.5$时，可以不计浅水影响。由$Fr_h=vs/\sqrt{gh}$

因此，不受浅水影响的最小水深为 $h_{min}=4v_s^2/g$。

华南理工大学
South China University of Technology

## 2. 从船型看

- ① 泰洛给出的最小水深，对于Cb<0.65的船为：

  当Fr＜0.27时，$h_{min}=33.6FrT$

  当Fr＞0.27时，$h_{min}=41.7(Fr-0.06)T$

- ② 高速货船：$h_{min}>7.0T$
- ③ 军舰：如巡洋舰、驱逐舰；$h_{min}>(7\sim12)T$
- ④ 滑行艇：$h_{min}>0.8L$ 或 $h_{min}>3.0B$

华南理工大学 South China University of Technology

## 3. ITTC最小水深公式

ITTC推荐的实船不计浅水影响的最小水深公式：

- 考虑浅水对回流的影响：$h > 3\sqrt{BT}$ $(Fr_h=0.5 \quad h_{min}=4v_s^2/g)$
- 考虑浅水对兴波的影响：$h > 2.75v_s^2/g$

分别按两式计算，并取两者之较大值作为试航时的最小水深。

7.2题舰：L=86m, B=8.95m, T=2.71m, Vs=26kn=13.36 m/s。则

考虑浅水对回流的影响：$h>3\sqrt{8.95*2.71}=14.8$ m

考虑浅水对兴波的影响：$h >2.75*13.36^2/9.81=50.0$ m

华南理工大学 South China University of Technology

# 2 确定浅水阻力的方法

确定浅水阻力或狭水道阻力的最好方法是进行船模试验；但相当多的船模试验池往往不具备该类试验的条件。因此常用近似方法估算。

## 一、许立汀中间速度法

## 二、阿普赫金法

华南理工大学
South China University of Technology

# 一、许立汀中间速度法

许立汀根据理论分析和大量船模试验结果，提出对给定的船舶，在已知深水阻力的基础上，只要分别计及浅水对兴波和流场的影响，就可得到浅水中阻力值。浅水对兴波影响用浅水中的波速损失 $\Delta c$ 表示，而对流场的影响则用浅水中的回流速度 $\Delta v$ 表示。

1. 两个假定

2. 确定 $\Delta c$ 和 $\Delta v$ 值

3. 浅水阻力曲线的作法

必须指出的是，许立汀中间速度法仅适用亚临界速度，即适用于船速：

$v < \sqrt{gh}$ 的情况。

华南理工大学 South China University of Technology

# 1. 两个假定

① 由于相同波长的波在浅水中的波速较深水减小△c，故假定船在深水中以速度$v_\infty$航行时的兴波阻力与在浅水中航速为 $v_i=v_\infty-\triangle c$ 时相等。称 Vi 为中间速度。实际计算时，上述兴波阻力的假定可以推广到剩余阻力。

② 由于浅水中存在回流速度△v，所以假定船在深水中航速为 vi 时的摩擦阻力与浅水中航速为$v_h=vi-\triangle v$ 时相当。

华南理工大学 South China University of Technology

在许立汀假定的相等阻力情况下，不同流场中相应速度关系如表所列。

许立汀中间速度法的相应速度关系

| 相等的阻力 | 相应流场中的速度 | |
|---|---|---|
| | 深水情况 | 浅水情况 |
| Rw,Rr | $V_\infty$ | $v_i=v_\infty-\triangle c$ |
| Rf | Vi | $v_h=v_i-\triangle v$ |

华南理工大学
South China University of Technology

# 2. 确定△c和△v值

① △c或中间速度vi的确定

② △v或浅水航速$v_h$的确定

① △c 或中间速度 vi 的确定：

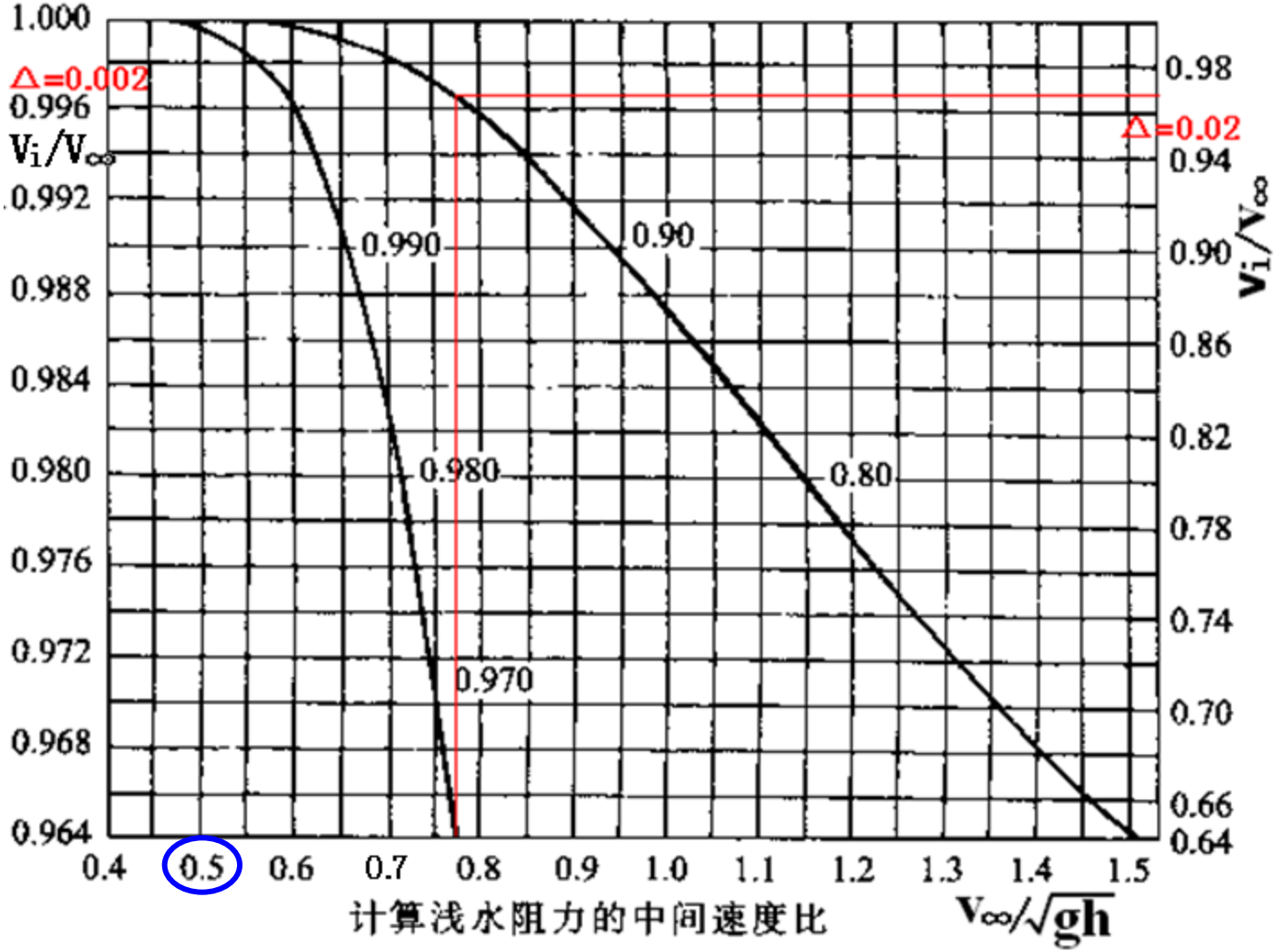
已知水深 h 和$v_\infty$时，可求得相应的△c。实用上为方便起见，作中间速度 vi 曲线图，可直接查得 vi 的值。式(8-3)可化为：

$$\frac{v_i}{v_\infty}=\frac{v_\infty-\Delta c}{v_\infty}=\sqrt{\tanh\frac{1}{F_{rh}^{\,2}}} \qquad \text{tanh(4)}$$

由图可见，当$F_{rh}$<0.5时，$v_i/v_\infty$趋于1.0，说明浅水对兴波阻力的影响可不计。

华南理工大学 South China University of Technology

# 计算浅水阻力的中间速度比





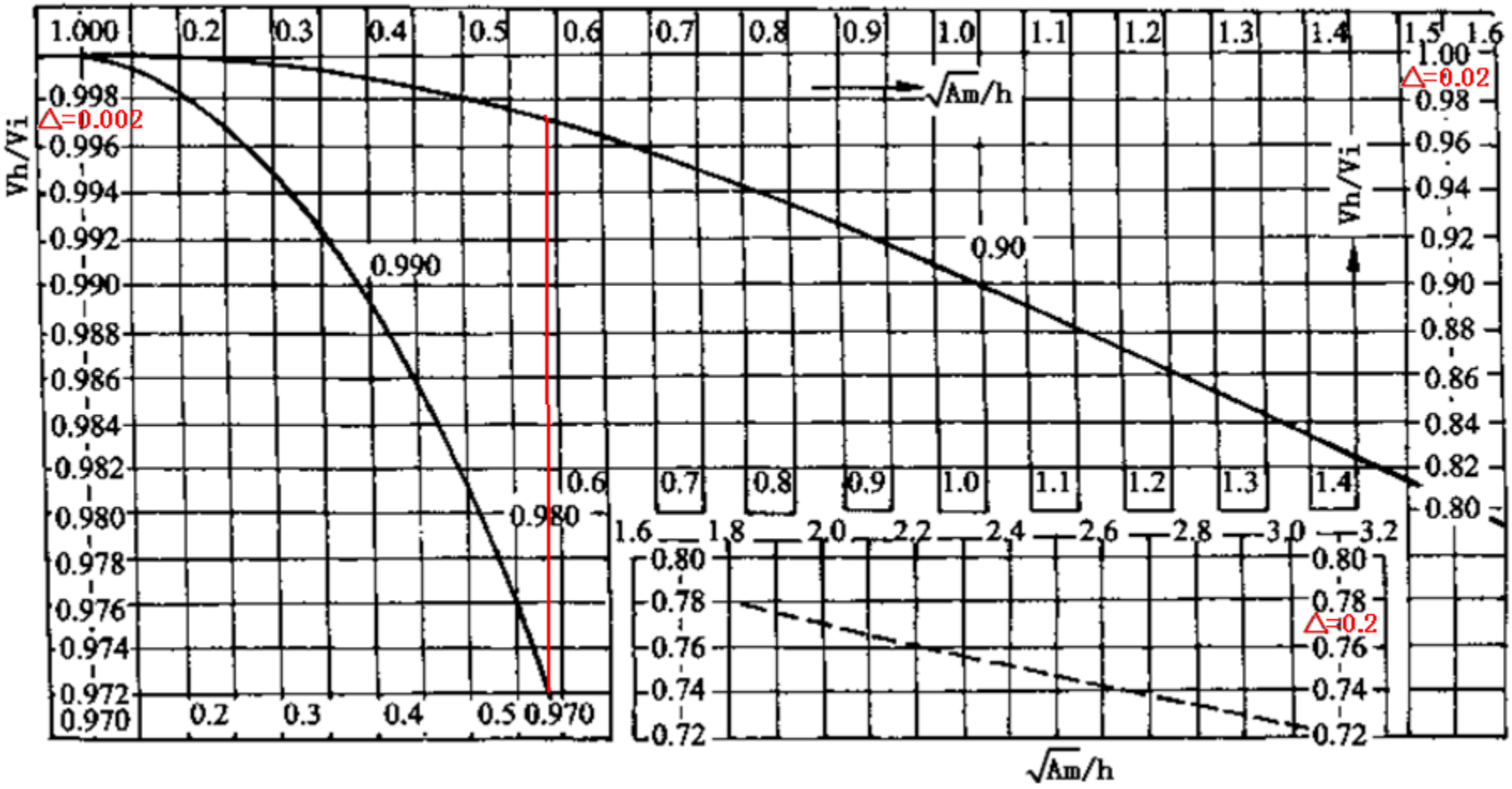
华南理工大学
South China University of Technology

## ② △v或浅水航速$v_h$的确定

试验结果表明，回流速度△v与$\sqrt{Am/h}$有关。当已知中间速度vi时，计入回流影响，则浅水中船对于静止水的相对速度为$v_h = v_i - \triangle v$，所以许立汀根据模型试验结果直接给出 $v_h$ 与$\sqrt{Am/h}$的关系，如图8-11所示。

华南理工大学
South China University of Technology

# 计算浅水阻力的中间速度比

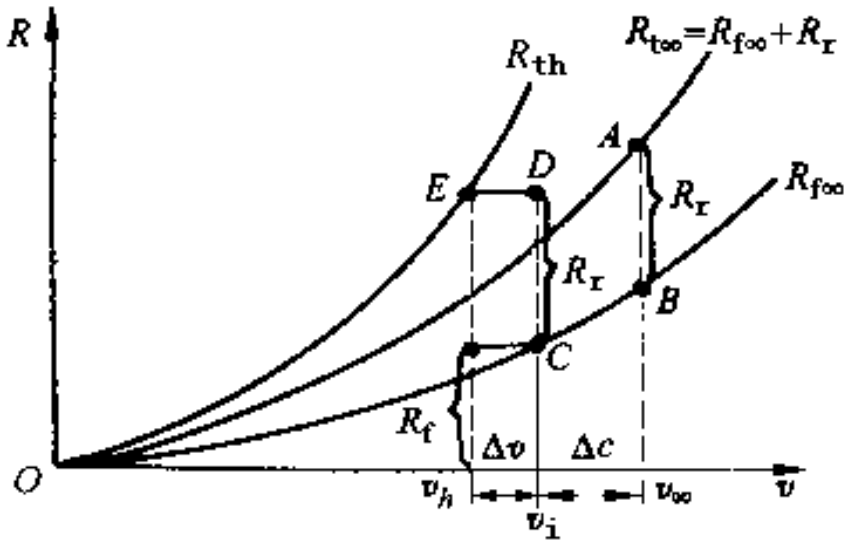



华南理工大学
South China University of Technology

# 3. 浅水阻力曲线的作法

如已知某船的深水总阻力曲线和摩擦阻力曲线，如图所示，则按照许立汀假定可求得该船的浅水阻力曲线。具体作法是：

➢① 设给定船速$v_\infty$，则在深水总阻力曲线Rt和摩擦阻力曲线Rf上分别得到A、B两点，AB表示在深水中速度为$v_\infty$时的剩余阻力Rr。

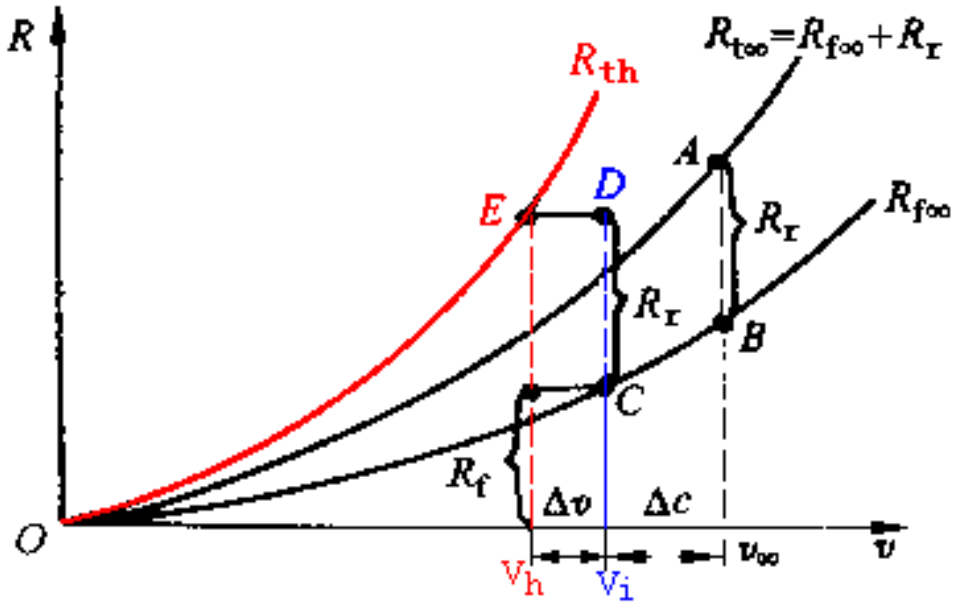



华南理工大学
South China University of Technology

➢② 根据已知水深 h 及$v_\infty$，算得相应的$Fr_h=v/\sqrt{gh}$ 值，并由图8-10查得 $v_i/v_\infty$值，进而得中间速度 vi 值。

➢③ 在$Rf_\infty$曲线上，在 vi 处得C点，并由C点向上量取已得的Rr值，得 D点。

➢④ 由已知$\sqrt{Am}/h$值，可从图8-11得到$v_h/v_i$值，进而得相应于$v_\infty$时在浅水中的航速$v_h$值。




➢⑤ 在速度坐标轴上截取$v_h$ 距离，并作垂直线与过D点的水平线相交于E点，则E点就是水深为h时该船的浅水总阻力曲线上的一点。

同理可作出其他航速时的各相应点，从而得该船的浅水总阻力曲线。

华南理工大学 South China University of Technology

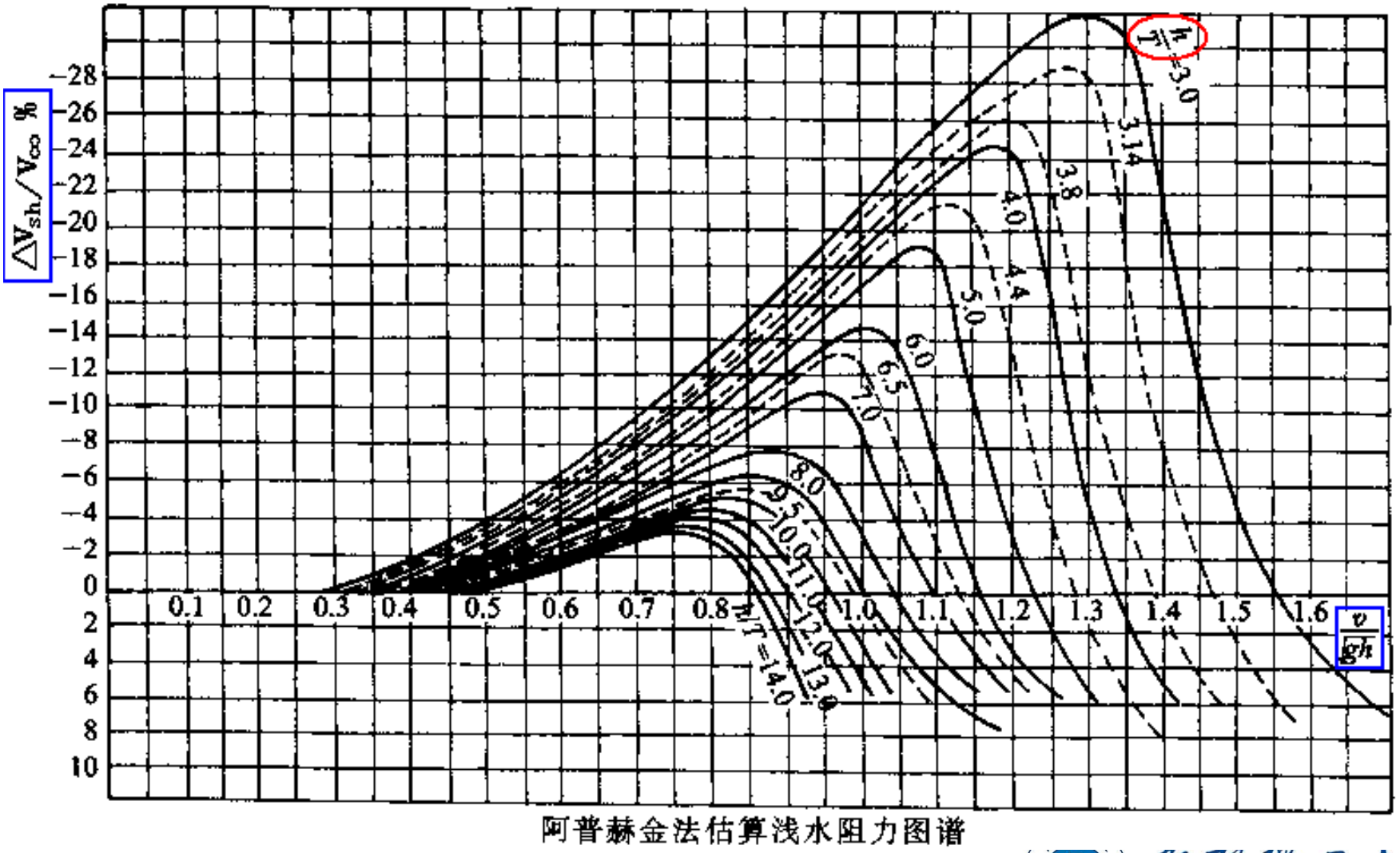
# 二、阿普赫金法

阿普赫金法是根据比较尖瘦船的浅水模型试验结果得到的。对于亚临界速度和超临界速度的船均可适用。

根据不同水深 h 情况的试验结果，绘制不同 h/T 时，船速损失比 $(v_\infty-v_h)/v_\infty=\Delta v_{sh}/v_\infty$ 与 $v_\infty/\sqrt{gh}$ 曲线，如图所示。

华南理工大学 South China University of Technology

图中Δvsh> 0 表示航速增加；反之表示船速下降。




阿普赫金法估算浅水阻力图谱

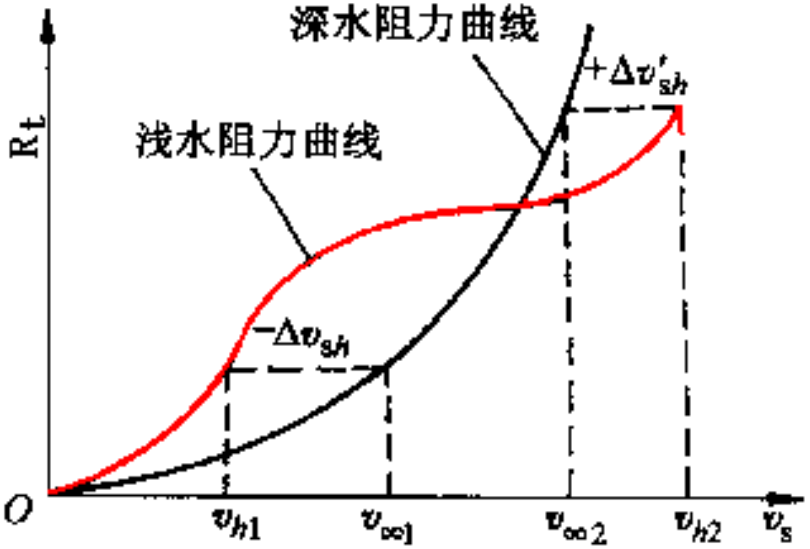
华南理工大学
South China University of Technology

当已知某船的深水阻力曲线时，可以作出给定水深 h 时的浅水阻力曲线。具体方法为：

➢1. 根据水深 h 和深水航速 $v_{\infty 1}$, 计算 h/T, $Fr_{h1}=v_{\infty 1}/\sqrt{gh}$。

➢2. 由 h/T、$Fr_{h1}$，用内插法, 查图8-13得 $\Delta v_{sh}/v_{\infty 1}$值。

➢3. 相应于$v_{\infty 1}$有相等阻力值的浅水航速$v_{h1}=v_{\infty 1}+\Delta v_{sh}$。



阿普赫金法确定浅水阻力

➢4. 在深水阻力曲线的航速坐标轴 $v_{h1}$ 处作垂直线，并截取$v_{\infty 1}$时的深水阻力值，即为浅水阻力曲线上的一点如图。

同理作出其他各点，从而得到相应的浅水阻力曲线。显见阿普赫金法不但应用范围较广，而且计算也比较简单方便。

华南理工大学
South China University of Technology

# 3 狭水道对阻力的影响

船舶在狭水道（如运河）中航行时，由于航道深度和宽度都受到限制，导致船舶周围的流场、兴波、航态及阻力等均与浅水航道中有许多不同。

华南理工大学
South China University of Technology

# 一、船在狭水道和浅水中航行的差别

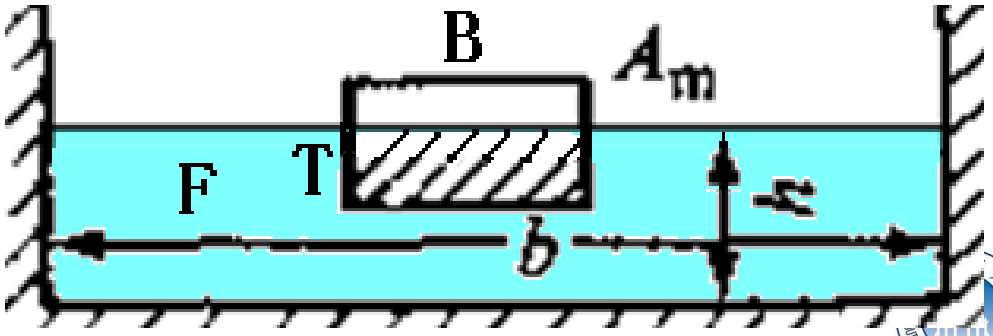
➢**1. 描述狭航道的表征参数：**

水深吃水比h/T，相对宽度b/B(或b/L)，断面系数F/Am。

式中：b 狭水道的宽，h 狭水道深，F 水道剖面面积；

B 船宽、L船长、T吃水，Am船中横剖面面积。

➢**2. 回流和兴波情况：**船在狭水道中航行时，不仅回流速度较浅水时有明显变化，且侧壁还导致散波反射，并与船体波系相互叠加，使兴波阻力发生变化。



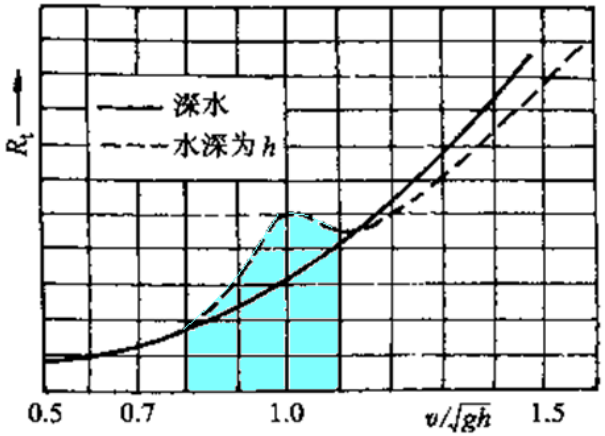

华南理工大学
South China University of Technology

# 船在狭水道和浅水中航行的差别

➢**3. 阻力曲线的特点：**船在狭水道中阻力曲线，在$Fr_h$＝1.0附近存在临界区，在该区域内阻力值有极为明显的增加；而临界区的范围与狭水道的宽度、船型有关。

在相同情况下，若狭水道宽增加，临界区域变窄；当趋于无限宽时，则仅在临界速度时最高，即为浅水问题，所以浅水可以看作是狭水道的特例。

船在狭水道中高速航行，特别在临界区航行时，不但阻力很大，而且由于波浪冲刷可能损毁堤岸，破坏河床，所以狭水道中航行的船大多为低速船，极少有接近或超过临界速度的。



浅水和深水中阻力曲线比较

华南理工大学
South China University of Technology

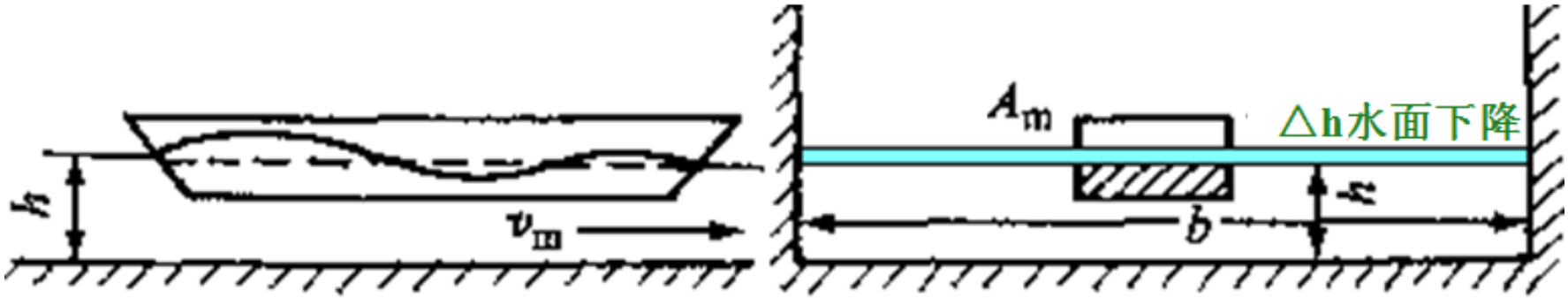
# 二、船在狭水道中运动的特点

讨论矩形横截面狭水道中绕静止船的流动问题，假定船体横剖面沿船长变化小，船体无纵倾，船的傅汝德数 Fr 较小，可忽略兴波对水面变形的影响。则：

由连续方程得：$bhv_s=(bh-A_m-b\triangle_h)v_m$

由伯努利方程：$\rho g\triangle_h=\rho(v_m^2-v_s^2)/2$

或：$\triangle_h=(v_m^2-v_s^2)/2g$




狭水道剖面图

South China University of Technology

由上述两式，最终得：

$$\frac{v_s}{c}=\frac{v_m}{c}\left[1-m-\frac{\left(\frac{v_m}{c}\right)^2-\left(\frac{v_s}{c}\right)^2}{2}\right]$$

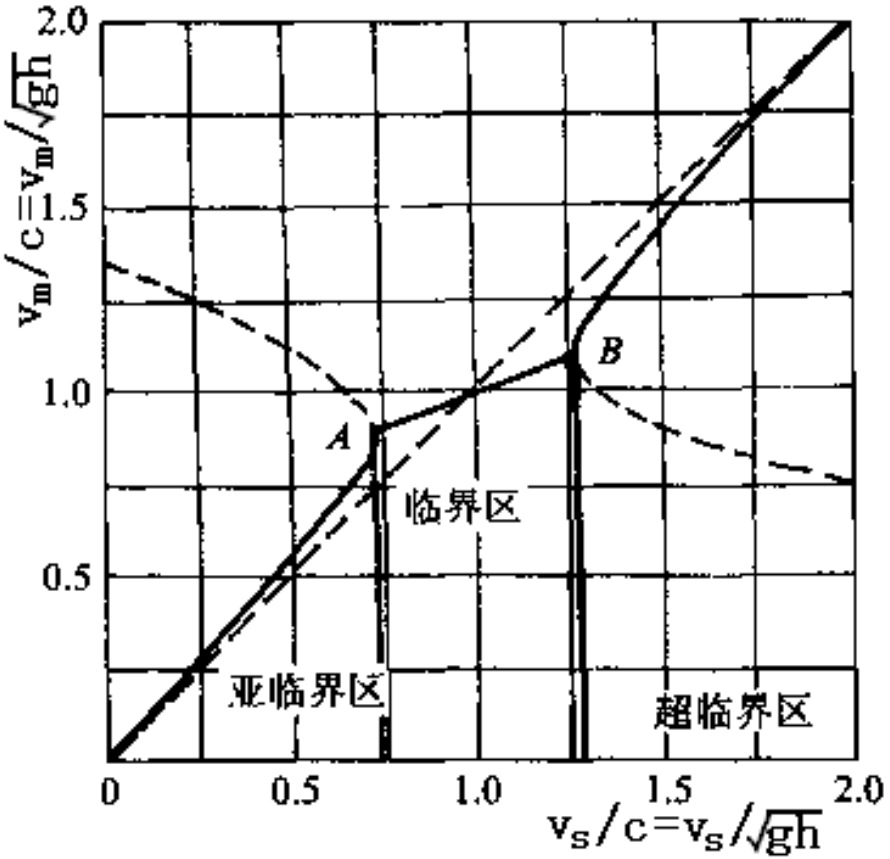
式中：$c=\sqrt{gh}$ 为极限波速，$m=A_m/bh$ 称为阻塞系数。

当参数m=常数，给定 vs/c，上式是关于vm /c的三次方程。

华南理工大学 South China University of Technology

图为$m=A_m/bh=0.1$时方程的解。可见对应一个$v_s/c$，速度$v_m/c$ 可有两个值，其中虚线部分仅是数字解，实线才是实际解。A、B对应的速度$v_1$、$v_2$分别称为第一 和 第二临界速度。而 $v_1<v<v_2$ 的速度区域为临界区域。

故船在狭水道中航行，按船速可分为如下三个区域：

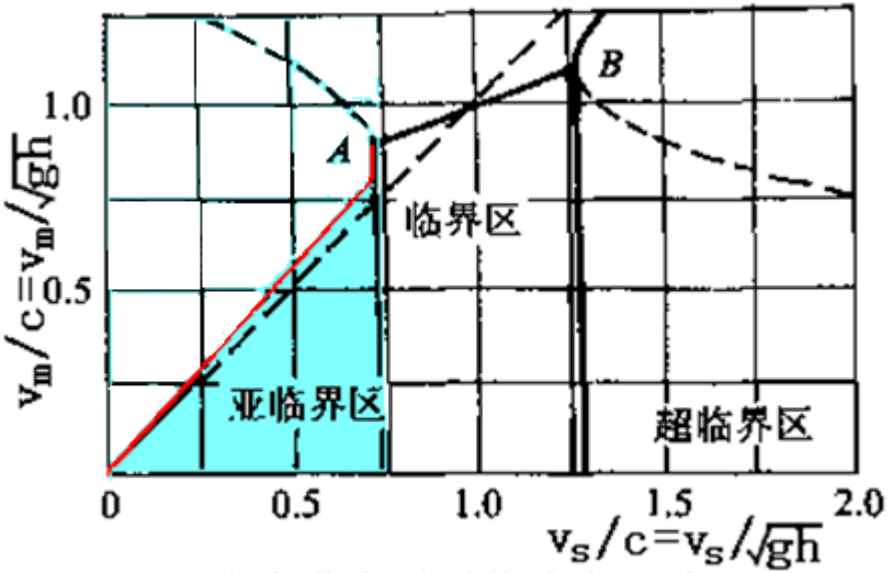



狭水道中不同的速度区域

华南理工大学
South China University of Technology

# 1. 亚临界速度区域

在 $v_s/c < v_1/c$ 区域内，水相对船体的速度$v_m$大于船速$v_s$，因而有回流速度$\triangle v_s = v_m - v_s$。狭水道的回流速度较浅水大，摩擦阻力有较大的增加；同时回流速度增加，使狭水道中沿船体纵向压降增大，由于压降的增大，不但可能引起边界层分离，且使兴波的波幅较浅水情况大。




狭水道中不同的速度区域

华南理工大学
South China University of Technology

# 亚临界速度区

试验表明：在较低速时，主要是粘性阻力增加；但 $Frh > 0.5$ 时，则主要是兴波阻力的增加，特别是当船速接近$v_1$时，独波以船速一起前进，船体兴波阻力急剧增加。

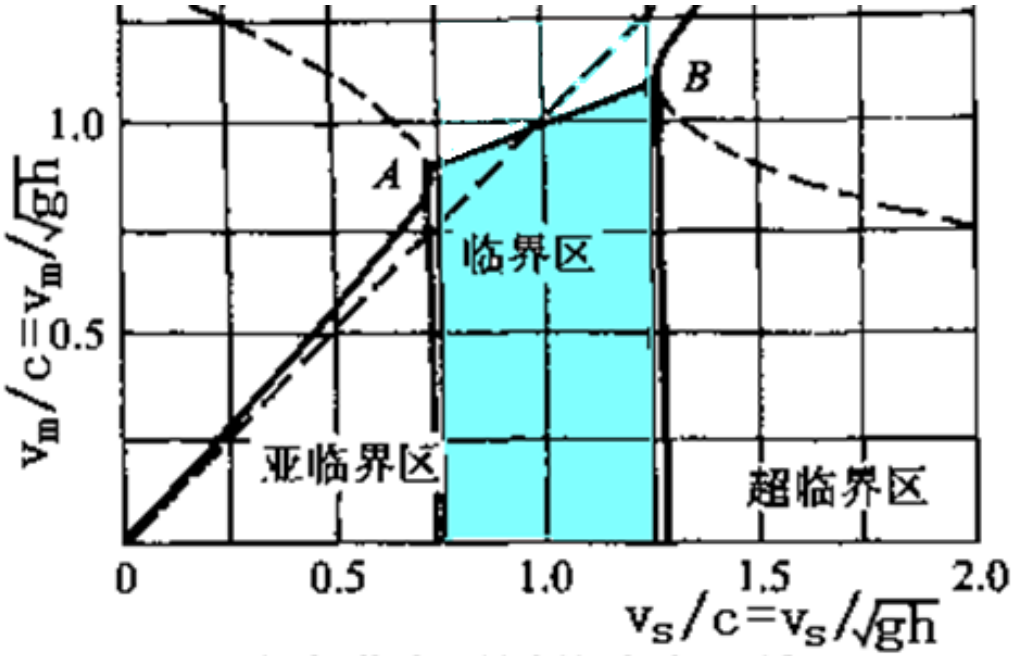
由于回流速度比浅水时大，故相应的压降比浅水大，从而船体下沉和尾倾比浅水时大，以致可能有船底与河底相撞的危险。特别是航速较高时，不但这种危险性增大，而且船体阻力增加很大。

兴波对航道的破坏作用相当明显，为此，狭水道中航行的船舶，其航速都受到限制，要求 $vs < 0.55\sqrt{gh}$。

华南理工大学
South China University of Technology

# 2. 临界速度区域

$v_1/c<vs/c<v_2/c$，绕船体的流动既复杂又不稳定。当航速超过$v_1$后，船体阻力增大的情况变得较为缓慢，直至达到$v_2$值，阻力达到最大值。总的看，整个临界速度区域内，由于流态不稳定，船的浮态也很不稳定。

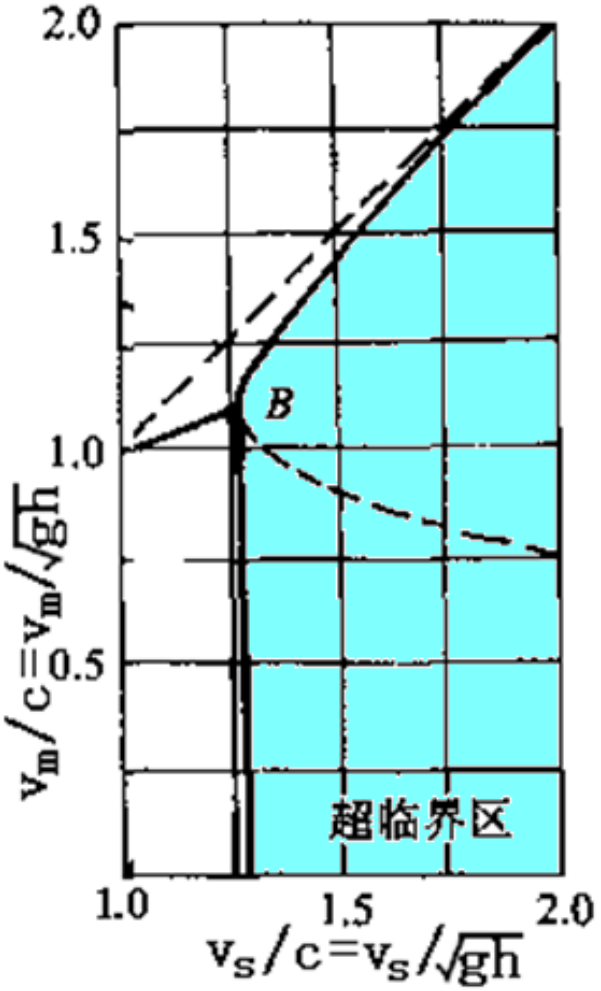



狭水道中不同的速度区域

华南理工大学
South China University of Technology

# 3. 超临界速度区域

$v_2/c<vs/c$，与亚临界区域相反，由于$vm/c <vs/c$，出现负的回流速度，水相对船体的速度小于船速。此时不但摩擦阻力较深水情况为小。且横波已跟不上船速，在船体附近仅剩下扩散逐渐缩小的散波，因而该区域内的阻力反而骤然下降。由于水与船体相对速度减小，所以水面升高，船体正浮，纵倾角也较临界速度区减小。




华南理工大学
South China University of Technology

# 三、狭水道阻力的估算

在狭水道中航行的船舶，由于航速受到限制，因而大多数都属于在亚临界速度区内航行，其运动特点与在浅水中航行的船舶基本相同。为此，将许立汀中间速度法作适当的引申即可用于狭水道船舶的阻力估算。

具体只需要注意狭水道如下一些特殊情况，并作适当处理：

（1）由于在狭水道中的航速较低，其较深水情况的阻力增加值认为主要是粘性阻力。因此在估算狭水道中的船舶阻力时，只考虑与深水航道中回流速度的增加值，而不考虑船舶兴波变化的影响；

（2）考虑到狭水道的表征参数与浅水有所不同，所以在求狭水道中的许立汀回流速度时，使用参数$Am^{0.5}/r_h$代替浅水问题中的参数$Am^{0.5}/h$。

其中$r_h$称为水力半径，表示为：

$$r_h = \frac{bh - A_m}{b + 2h + G_m}$$

式中 Gm— 船舶中横剖面的湿围长度。

华南理工大学 South China University of Technology

# End



South China University of Technology